УДК 621.378.681.5.555

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ПРИНЦИПА СКАНИРОВАНИЯ ФАЗОВОГО ПРОСТРАНСТВА ОПТИЧЕСКИМ ФАЗОМЕТРОМ: 1. ПОИСКОВЫЕ ТРАЕКТОРИИ

С.М. Слободян

Инновационный центр "ТЕСТ". г. Томск
E-mail: IC_Test@ inbox.ru

Проведен анализ различных траекторий сканирования пространства оптическим следящим фазометром. Найдено, что оптимальным по вероятности обнаружения объекта при срыве слежения является алгоритм расходящегося с точки потери построчного сканирования пространства наблюдения.

Понятие локации и назначение локационных систем любого класса всегда [1–6] отождествляется с решением задачи обнаружения и определения местонахождения искомого объекта в некотором N-мерном пространстве или поле наблюдения. В качестве основных параметров, отражающих местоположение объекта, обычно принимают линейные или угловые координаты, их изменение и удаление объекта от системы в наблюдаемом пространстве. Задача обнаружения и оценки координат положения объекта в пространстве решается системами в темпе реального или квазиреального масштаба времени. Квазиреальность объясняется наличием задержки принятия решения. Подвижность объекта контроля, широкий формат пространства, весьма малые, по сравнению с форматом пространства, размеры элемента покрытия пространства, локация узконаправленными лазерными пучками и т.д. обуславливает применение сканирования или поочередного просмотра отдельных областей – ячеек пространства. Это необходимо для получения информации об изменении в структуре наблюдаемого поля и последующего ее анализа, формирования оценок и принятия решения о наличии или отсутствии каких-либо изменений в пространстве наблюдения. Сканирование производится с целью обнаружения объектов в заданном пространстве, определения координат их местонахождения, последующей оценки их траекторных изменений при сопровождении и наведении по требуемой траектории их перемещения в координатной системе наблюдаемого пространства.

Гетеродинные интерферометрические системы обладают высокой чувствительностью среди измерительных, телевизионных, локационных и навигационных средств [1–6]. Спецификой этих систем

является то, что видеосигнал, формируемый фотоприемником гетеродинной интерферометрической системы, сохраняет информацию о структуре распределения фазы поля на входе системы или о пространственно-временной структуре и особенностях фазового пространства наблюдаемого поля. Использование структурных факторов распределения фазового поля представляет интерес при решении задачи обнаружения объекта – основной задачи, решаемой оптическими и телевизионными измерительными системами. "Классическая" процедура обнаружения объекта в пространстве наблюдения основана на алгоритме действий, включающем: сканирование широкоформатного пространства малым элементом покрытия, соизмеримым с требуемым пространственным разрешением; получение одно- или двумерной реализации смеси сигнала и помех, отражающей их пространственное распределение, с последующей фильтрацией и обработкой смеси по выбранным процедурам. Решение о наличии объекта в наблюдаемом пространстве принимается при превышении профильтрованной реализации смеси сигнала с шумом некоторого порогового уровня. Пороговый уровень принятия решения о наличии/отсутствии объекта устанавливается решающим устройством в соответствии с принятым в системе критерием обнаружения. Обычно задачу обнаружения приходится решать в условиях априорной неопределенности (наличия/отсутствия и неизвестности местоположения объекта) при неизвестных моделях сигналов, помех и условиях воздействий на пространство наблюдения. Для любых критериев обнаружения и процедур обработки массива данных о сигналах и помехах, как показывают исследования систем прямого детектирования [4, 6], алгоритм последовательности просмотра отдельных ячеек пространства играет важную роль для достижения максимума отношения сигнал/шум и вероятности обнаружения объекта.

Целью настоящей работы является анализ и систематизация алгоритмов анализирующего сканирования фазового пространства гетеродинными и интерферометрическими системами. Основное внимание уделено расширению принципиальных возможностей этих систем с рассматриваемыми траекториями сканирования трехмерного пространства.

Настоящая работа посвящена анализу возможностей применения телевизионных способов сканирования наблюдаемого пространства, сопоставлению и оценке эффективности телевизионных методов сканирования фазового пространства в гетеродинных, интерферометрических и подобных им системах. Первые результаты эффективности применения телевизионных принципов в следящих оптических фазометрах частично изложены автором ранее, например, в [4, 7, 8]. Применение телевизионных принципов сканирования значительно (на несколько порядков) расширяет динамический диапазон однозначного определения формы волнового фронта при больших изменениях фазы [8, 9]. Телевизионный принцип сканирования фазового пространства позволяет эффективно отслеживать изменения фазы волнового фронта как глобального (порядка $N\lambda$), так и локального ($< (10^{-3}...10^{-4})\pi$) характера.

Гетеродинные и интерферометрические системы преимущественно предназначены для работы в малом поле, не превышающем пространственных размеров области когерентности излучения. Это объясняется тем [1, 2, 6, 8], что в гетеродинных системах фотоприемник с большой (диаметром D) оптической апертурой в отсутствие турбулентности принимает излучение (длиной волны λ), отраженное от малой области объекта (удаленного на расстояние L), направление на которую совпадает с направлением прихода опорной волны. Размер этой области ($\sim\lambda L/D$) определяет угол зрения гетеродинной системы, равной дифракционному углу λ/D, не зависящему от габаритов наблюдаемого объекта и радиуса когерентности поля на приемной апертуре. При наличии турбулентности атмосферы существует оптимальный размер сканирующего элемента покрытия наблюдаемого фазового пространства [3], функционально зависящий от параметров системы и интенсивности турбулентности на трассе сопровождения. Т.о., введение сканирования фазового пространства в гетеродинных системах соответствует поочередному последовательному просмотру ячеек фазового пространства размером дифракционного порядка.

При работе в интегральном широкоформатном поле, охватываемом приемной оптикой системы, для сопровождения объекта наблюдения используют механическое перемещение всего поля наблюдения. Примерно такой же подход используют в телевизионных системах на основе многоэлементных приемников изображения, размер поля наблюдения, разрешающая способность и другие параметры которых ограничиваются топологией и структурно-функциональными аспектами их физической основы и принципа действия. Так, например, разрешающая способность фото- и видеокамер на основе фотоприемных приборов с зарядовой связью (ФПЗС) ограничена размерами их элементов, которые, в свою очередь, определяются топологией, количеством и структурой фазных электродов в элементе и т.п., а также скоростью переноса информации. Для уменьшения влияния дискретности покрытия пространства на оценку координат дифракционного изображения объекта, размеры которого соизмеримы с размером элемента покрытия, используют расфокусировку его изображения, исключая случайное попадание изображения малого размера на два смежных элемента ФПЗС. Расфокусировка, как сканирование вдоль продольной оси пространства наблюдения, позволяет при равных потоках повысить точность точность оценки координат энергетического центра тяжести дифракционного изображения объекта по его "размытому" на несколько элементов ФПЗС аналогу. При этом снижается предельная чувстви-

тельность системы, ограничивая возможность улучшения других характеристик системы. Поскольку сканирование применяется в гетеродинных и интерферометрических системах, то представляет интерес исследование особенностей использования в таких системах различных видов сканирования пространства, их влияние на потенциальные характеристики, оценка и анализ сравнительной эффективности применяемых алгоритмов и траекторий поискового сканирования пространства на основе статистических критериев.

Для сканирования в плоскости, ортогональной продольной координате (удаление объекта) пространства, могут применяться [4, 5]: однострочные циклический и кольцевой алгоритмы просмотра ячеек по одной из координат с одновременным перемещением углового поля по другой координате и растровые алгоритмы двух- и трехмерной последовательности просмотра отдельных ячеек пространства. Разнообразие применяемых алгоритмов сканирования ограничено степенью изобретательности, фантазией разработчика, а также физическими ограничениями принципов технического исполнения. Из растровых алгоритмов сканирования наиболее широко используются: построчная "прогрессивная" (с коротким обратным ходом) и реверсивная (прямой и обратный ходы строчной и кадровой траекторий являются рабочими); спиральная и квазиспиральная траектории просмотра ячеек пространства с постоянными скоростью и периодом сканирования витка спирали независимо от его порядкового номера в растре, а также розеточный алгоритм просмотра ячеек пространства. Форма и тип пространства наблюдения объекта определяют форму и тип алгоритма и траектории сканирования пространства.

Спецификой поискового алгоритма сканирования фазового пространства является обеспечение возможности его остановки в момент появления на выходе фотоприемника системы наблюдения пространства сигнала от искомого объекта, его запоминания и выдачи остановки сигналов, соответствующих координатам искомого объекта или его изображения в плоскости фотоприемника. Устройство сканирования должно обеспечивать запоминание координатных сигналов на длительное время, необходимое для осуществления повторного цикла поискового сканирования или ожидания появления искомого объекта (его изображения) при отсутствии или замирания сигнала, независимо от причин, вызвавших потерю объекта или пропадание его изображения. При сканировании по продольной и поперечным координатам пространства наблюдения возможным является симбиоз как однотипных, так и разнотипных алгоритмов и траекторий поискового сканирования.

Рассмотрим принципы формирования широко распространенных траекторий и алгоритмов сканирования в режиме обнаружения искомого объекта (заданной структуры, спектра и т.п.). Растр сканирования пространства образуется совокупностью траекторий алгоритмической последовательности просмотра отдельных ячеек пространства, соответствующих линиям перемещения элемента сканирования (лазерного луча, базисного элемента сканатора и т.п.) или закономерности перебора отдельных ячеек приемника изображения, приведенных к объектной плоскости пространства или плоскости изображения, совмещенной с фоточувствительной плоскостью приемника системы.

Однострочное сканирование. Растр сканирования, образованный однострочной траекторией последовательности просмотра отдельных ячеек пространства (рис. 1, *а*), представляет собой полосу, ориентированную вдоль одной из координатных осей, длина которой определяется соответствующим ей размером пространства, а ширина – поперечным к строке его размером. Однострочная траектория поискового сканирования применяется только в том случае, когда с вероятностью, сколь угодно близкой к единице, известно, что траектория движения изображения объекта или сам объект пересечет строку сканирования. Чаще всего [3–5] однострочная траектория сканирования используется совместно с дополняющим ее электронным, оптическим или механическим сканированием по кадру (например, за счет вращения летательного аппарата вокруг своей оси для его пространственной стабилизации). Наибольшее распространение в оптических фазометрах для осуществления сканирования фазового пространства получили [1–5, 7–10] пьезоэлектрические приводы. Находят также применение магнитострикционные и приводы микроперемещений на основе магнитоупругого эффекта Видемана [11]. Отдельные приводы сканирования, ввиду значительной инерционности больших перемещающихся масс, обладают малым быстродействием и не удовлетворяют требованию мгновенной остановки анализирующего сканирования в точке возможного местонахождения объекта. Для поиска движущегося объекта строка поискового растра выставляется на пути его движения или может быть использован однострочный алгоритм поискового сканирования по контуру поля. При определении параметров систем с однострочным алгоритмом сканирования пространства наблюдения, исходя из требований обнаружения и опознавания объекта наблюдения, за основу принимают размер пространства наблюдения, период строчного сканирования T_c и скорость перемещения элемента сканирования по строке V_c. Закономерность перемещения элемента сканирования по кадру и строке может быть задана сигналами любой формы: синусоидальной, пилообразной с коротким обратным ходом, треугольной или ступенчатой (шаговый алгоритм) [3–5, 7, 8]. Предпочтительнее принять законы сканирования по линейной траектории перемещения элемента (ячейки) с требуемой скоростью сканирования поля пространства наблюдения.

Построчное сканирование. Это вид поэлементного алгоритма сканирования пространства может

быть осуществлен двумя способами. Последовательным поэлементным просмотром поля пространства наблюдения (рис. 1, *б*) с левого верхнего элемента до правого нижнего элемента поля пространства с постоянной скоростью и сохранением направления (слева – справа) строчного сканирования. Обратный ход цикла сканирования из крайнего правого элемента текущей строки в крайнее левое положение соответствует начальному элементу последующей строки и осуществляется достаточно быстро за время, соизмеримое с постоянной времени устройства управления сканированием. Траектория построчного сканирования формируется [4, 7, 8] путем подачи на устройства строчного и кадрового управления сигналов линейной или ступенчатой пилообразной формы с длительным прямым $T_{СП}$ и коротким $T_{СО}$ ($T_{СО} \leq T_{СП}$) обратным ходами траектории.

Реверсивное построчное сканирование создается формированием управляющих сигналов пилообразной или треугольной форм с равными по длительности прямыми и обратными ходами [4, 8]. Оба хода являются рабочими. Период траектории

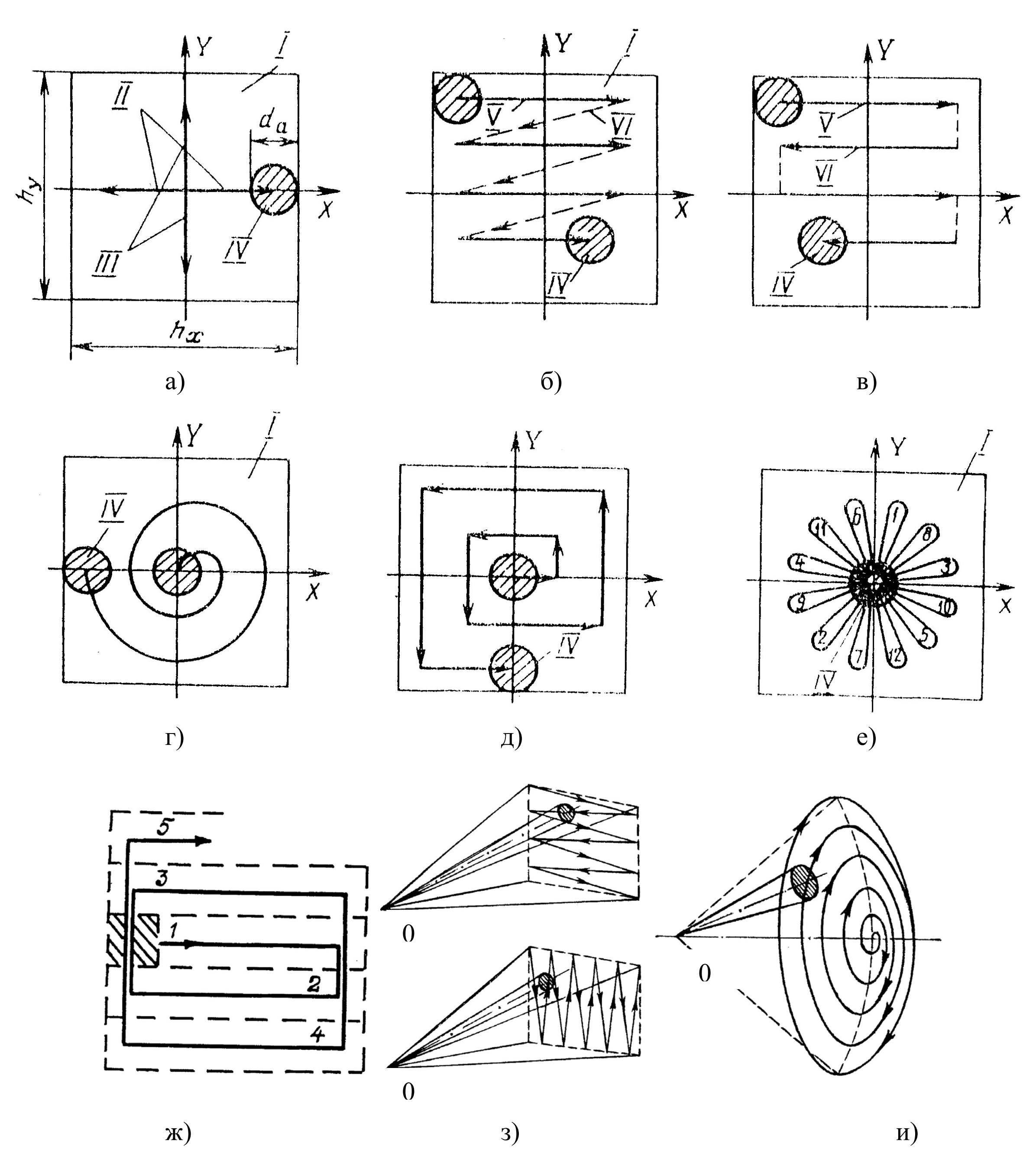


Рис. 1. *Структуры траекторий сканирования фазового пространства наблюдения оптическим фазометром: а) однострочная; б) построчная; в) реверсивная построчная; г) спиральная; д) квазиспиральная; е) розеточная (1–12 — номера ходов); ж) построчная, расходящаяся из центра; з) методом двойной развертки; и) спиральная; h_x и h_y — размеры поля; I — поле сканирования; II — строка; III — сканирование по кадру; IV — элемент; V и VI — прямой и обратный ходы*

строчного сканирования в этом случае равен сумме времен, затрачиваемых на формирование двух смежных строк, являющихся прямым и обратным ходами сканирования, т.е. $T_С=T_{СП}+T_{СО}$.

Кадровое сканирование может осуществляться непрерывно – подачей сигнала управления сканированием по кадру линейно-нарастающей (ниспадающей) формы или скачкообразным перемещением строк (при ступенчато-шаговом законе управления) (рис. 1, *в*). В обоих случаях могут быть использованы как аналоговые, так и цифровые шаговые алгоритмы изменения управляющих сканированием сигналов [3–5]. Период строчного сканирования и время кадра, определяющие число строк и структуру поискового растра, выбираются исходя из условий обнаружения объекта в пространстве, непосредственным образом связанных с динамическими, энергетическими и геометрическими характеристиками пространства наблюдения и объекта. Если время пребывания объекта в пространстве значительно (в два и более раза) превышает время кадра, то сканирование пространства будет периодически повторяться с периодом кадровой развертки $T_К$ (многокадровый режим). При равновероятном направлении входа объекта в наблюдаемое пространство может быть использован (рис. 1, *з*) метод попеременной смены направлений строчного и кадрового – двойного ортогонального сканирования пространства [5].

Спиральное сканирование. Траектория формирования этого типа растра, образуемого наиболее широко применявшейся ранее спиральной поэлементной разверткой, начинается с исходного центрального элемента поля пространства наблюдения объекта и по траектории расходящейся спирали перемещается из центра поля к краю пространства наблюдения. Возврат в центр поля может быть осуществлен в одних случаях (рис. 1, *г*) за короткое время (обратный ход нерабочий), в других, когда обратный ход к центру является рабочим, элемент сканирования при возврате в исходное положение описывает траекторию сходящейся спирали. Известны способы формирования спирального сканирования с постоянными линейной, угловой и с логарифмически изменяющимися скоростями. Не останавливаясь на них подробно, приведем общие для данного класса алгоритмов сканирования недостатки, которые ограничивают их применение в качестве поисковых: нелинейность, неравномерность разрешающей способности по полю и отсутствие возможности остановки процесса сканирования пространства для анализа участка поля, "подозрительного" с точки зрения наличия или отсутствия искомого объекта.

Так как спиральная траектория сканирования создается гармоническими сигналами управления, то любая задержка по времени означает либо прекращение просмотра всей последующей за точкой остановки части поля и пространства наблюдения, либо пропуск такой части пространства или поля, которые по размеру соответствуют размерам участка спирали, формируемого за время остановки сканирования. Это неприемлемо для осуществления последовательной процедуры обнаружения объекта с наибольшей достоверностью.

Квазиспиральное сканирование [4]. Растр квадратного квазиспирального сканирования (рис. 1, *д*) образуется линейной закономерностью перемещения элемента. Траектория перемещения элемента сканирования в структуре квазиспирального растра образуется попеременной последовательностью сканирующих ходов, строго ориентированных вдоль координатных осей пространства. Формирование квазиспирального растра происходит следующим образом. Элемент (ячейку) сканирования, находящийся в исходном состоянии в центре растра (поля пространства), перемещают по одной из осей декартовой системы координат на один шаг сканирования, равный по величине, например, размеру одного элемента поля (ячейки пространства). Затем с тем же шагом осуществляется сканирование элементом в направлении второй координатной оси, ортогональной первоначальному шагу сканирования. При этом предыдущее смещение элемента по первой оси сохраняется. В последующих циклах длина сканирующих ходов увеличивается на один шаг в каждом очередном полувитке прямоугольного вида спирали. Сканирующие шаги в четных и нечетных полувитках спирали имеют противоположное направление. Описанный алгоритм формирования квадратной квазиспиральной траектории сканирования повторяется непрерывно вплоть до момента достижения сканирующим элементом установленных границ поля пространства. После этого сканирование повторяется в обратной порядке (реверсивное сканирование) или элемент сканирования скачком возвращается в исходную центральную точку анализирующего растра.

Форма сигналов i_x и i_y, образующих квазиспиральный растр, приведены на рис. 2. Этот способ формирования спирального растра прямоугольной (квадратной) формы позволяет осуществлять остановку или задержку процесса сканирования в любой точке поля и пространства без пропуска отдельных его участков с последующим сохранением траектории и направления перемещения элемента сканирования. Описанный способ позволяет получать квазиспиральное сканирование прямоугольной, квадратной и других геометрических форм как с постоянной линейной скоростью, так и с постоянным периодом сканирования витка спирального растра любой координатной ориентации.

Розеточное сканирование [4]. Розеточная траектория сканирования (рис. 1, *е*), по которой осуществляется просмотр отдельных ячеек пространства с целью обнаружения объекта, получается при управляющих сигналах (рис. 2, *в*), описываемых уравнениями

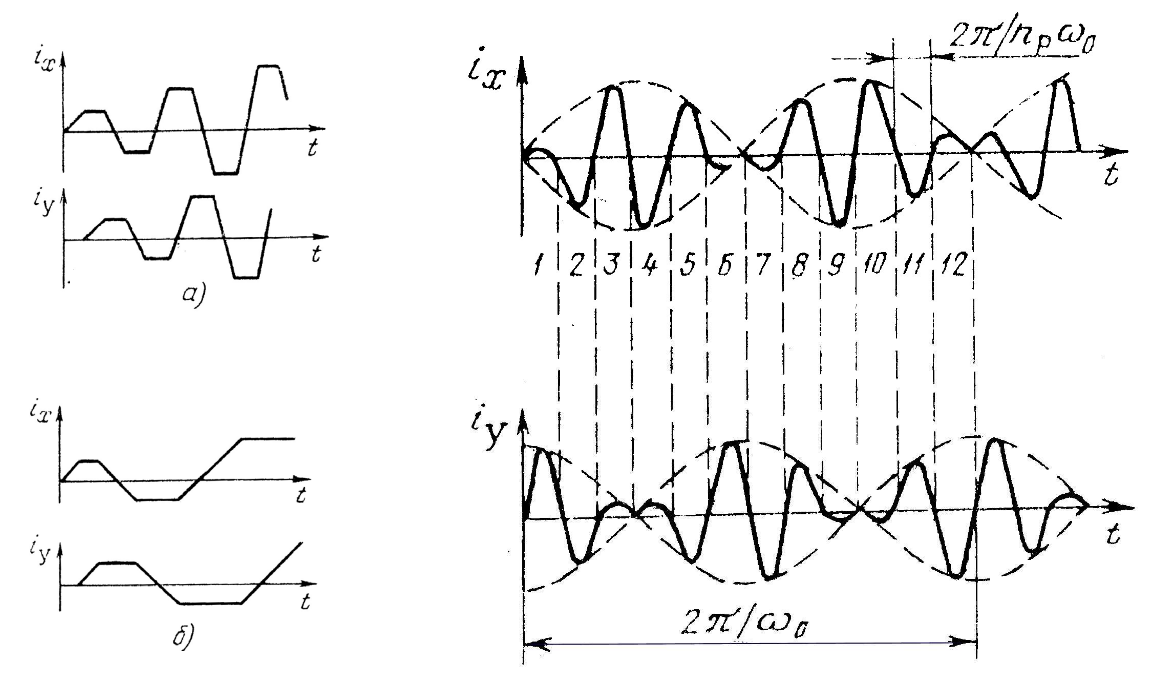


Рис. 2. *Форма сигналов управления сканированием по алгоритму квазиспирального растра: а) с постоянным периодом и б) с постоянной скоростью сканирования витка спирали и в) розеточного растра*

$$i_x = I_M \sin n_p \omega_0 t \sin \omega_0 t;$$

$$i_y = I_M \sin n_p \omega_0 t \cos \omega_0 t,$$

где I_M – амплитуда сигнала, определяющая диаметр розеточного растра; n_p – отношение частот модулирующего и основного сигналов управления, равное числу лепестков розетки; $\omega_0/2\pi$ – число полных розеток, формирующихся в 1 с.

Формирование розеточного растра сканирования происходит следующим образом. В течение положительного полупериода сигнала основной частоты формируется один лепесток розетки, а в отрицательный полупериод – другой лепесток в направлении, противоположному первому. За один полупериод модулирующего сигнала синусоидальной формы развертывается полное поперечное поле пространства. Лепестки розетки, формируемые за время второго полупериода модулирующего сигнала, размещаются в промежутке между лепестками, сформированными в первом полупериоде сканирования. Параметры розетки сканирования выбираются таким образом, чтобы просмотр каждого элемента поля поиска осуществлялся, по крайней мере, один раз в процессе формирования полного розеточного растра. Частота формирования розеток определяется требуемым отношением сигнал-шум и динамическими характеристиками объекта и геометрическими пространства наблюдения. Число лепестков розеток, необходимое для полного охвата поля пространства поиска, $n_p=\pi D_p/d_a$, где D_p – диаметр поля, перекрываемого розеточным растром; d_a – диаметр или размер сканирующего элемента. Скорость анализирующего сканирования $\upsilon_{ск.р}=n_pD_p/T_p$, где T_p – время формирования розетки. Розеточным траекториям сканирования свойственны те же недостатки, что и спиральным. По принципу розеточной могут быть получены любого типа гипоциклоидальные траектории сканирования фазой в заданном пространстве. То есть, с использованием канонических уравнений можно получить сканирование фазой волнового фронта по любой поверхности второго порядка.

Для осуществления поискового сканирования пространства с целью обнаружения объекта, координаты которого заданы внешним целеуказанием или, в случае потери объекта при сопровождении (например, в условиях противодействия), с области срыва его сопровождения, может использоваться тип расходящегося построчного сканирования (рис. 1, *ж*). Этот вид сканирования обладает всеми достоинствами построчных траекторий поэлементного анализа пространства наблюдения.

Сравнительная эффективность различных траекторий поискового сканирования фазового пространства наблюдения в следящих оптических фазометрах может быть оценена на основе использования методологии общей теории статистических решений. Так, например, существенный для теории и практики системотехники интерес представляет определение оптимальных по принятым статистическим критериям алгоритмов и траекторий просмотра областей пространства местонахождения объекта или его изображения по данным целеуказания, после его потери, при срыве слежения. Согласно общей теории статистических решений одним из основных показателей эффективности решения поисковой задачи анализа и оценки состояния пространства наблюдения является вероятность обнаружения по определенным признакам искомого объекта. В общем случае, она равна произведению вероятностей пе-

рехвата объекта за время $T_{пр}$ его пребывания в наблюдаемом пространстве и обнаружения сигнала от объекта или его изображения в присутствии помехового воздействия. Вероятность перехвата объекта в пространстве наблюдения зависит от точности задания целеуказания или определения координат положения объекта на предыдущей стадии функционирования системы, скорости перемещения объекта, времени задержки начала включения повторного поиска относительно момента выдачи координат последнего целеуказания, размеров поля поиска, а также закона распределения положения объекта в пространстве наблюдения.

В реальных ситуациях плотность распределения вероятности положения объекта в поле поиска являющегося изображением пространства наблюдения в точке $[x; y] = r(t)$ можно с некоторым приближением аппроксимировать функциями, отражающими соответственно равномерный, усеченный гауссовый и гауссовый законы распределения:

$$W[r(t)]=[0,\ |r|>|r_1|,$$
$$t>T_{ПР};\quad 1,\quad |r|\le|r_1|,\ t>T_{ПР}];\qquad (1)$$

$$W[r(t)]=\begin{cases}1, & |r|<|r_1|\\ 1/(K_\sigma\sqrt{\pi(r_B^2-r_1^2)})\times & \\ \times\exp[-(r^2-r_1^2)/[K_\sigma^2(r_B^2-r_1^2)], & |r|>|r_1|\end{cases}\qquad (2)$$

$$W[r(t)]=1/(K_\sigma r_B\sqrt{\pi})\exp[-r^2/(K_\sigma^2 r_B^2)],\quad r\equiv 0.\qquad (3)$$

Здесь r_1 – размер области достоверного и r_B – размер области вероятного пребывания объекта (обычно оцениваются на уровне $K_\sigma>0$, кратном некоторому значению σ: Для $K_\sigma r_B=\sigma$, $p(r)=0{,}32$; для $K_\sigma r_B=\sqrt{2}\sigma$, $p(r)=0{,}05$ и $p(r)=0{,}03$ для $K_\sigma r_B=\sqrt{3}\sigma$; σ – дисперсия координат положения объекта.

Рассмотрим три типа траекторий сканирования фазового пространства наблюдения, наиболее широко применяемых в следящих оптических фазометрах, работающих, например, по внешнему целеуказанию и на этапе повторного поиска: построчная прогрессивная (рис. 1, *б*), построчная расходящаяся от центра (рис. 1, *ж*), спиральная (рис. 1, *д*). Сопоставим эффективность этих алгоритмов сканирования фазового пространства на этапе поиска движущегося со скоростью объекта (или адекватно его изображения) с точки координат задания целеуказания или с точки его потери (при срыве слежения) по величине получаемой вероятности обнаружения объекта для каждого из алгоритмов. В этом случае: плотность вероятности изменения положения объекта описывается выражением, которое при повторном поиске с точки потери объекта, когда $r(t_0) = 0$, имеет вид

$$w(\upsilon_0 t) = (2\pi\sigma^2)^{-1}\exp[-\upsilon_0^2(t-t_0)^2/2\sigma^2],\qquad (4)$$

где t_0 – время памяти детектора канала слежения. При сравнительном анализе принимаем, что условная вероятность присутствия объекта в поле поиска пространства наблюдения, за время кадра $T_к\le 3\sigma/\upsilon_0$ не превышающее время его пребывания в наблюдаемом пространстве, равна 1. Вероятность перехвата объекта в поле пространства наблюдения оптическим фазометром согласно [4, 6] равна

$$P_{пер}=\iint p(x,y)w(x,y)dxdy,\qquad (5)$$

где $p(x,y)$ – условная вероятность нахождения объекта в точке (x,y) или перехвата при условии его пребывания в этой точке; $w(x,y)$ – плотность распределения координат положения объекта; $x^2(t)+y^2(t)=r^2(t)$. Из (5) получим выражения для описания эффективности траекторий:

– спиральной – $P_{сп.}=4\Phi(U_x)\Phi(U_y)$; (6, *а*)

– построчной расходящейся – $P_{пр.}=2\Phi(U_y)$; (6, *б*)

– построчной прогрессивной – $P_{пп.}=0{,}5+\Phi(U_y)$; (6, *в*)

где $\Phi(U)=\frac{1}{2\pi}\int_0^U \exp(-0{,}5t^2)\,dt$ – интеграл вероятности, $U=K_n\upsilon_0$, K_n – коэффициент, выраженный в долях (σ/υ_0), x и y – координаты.

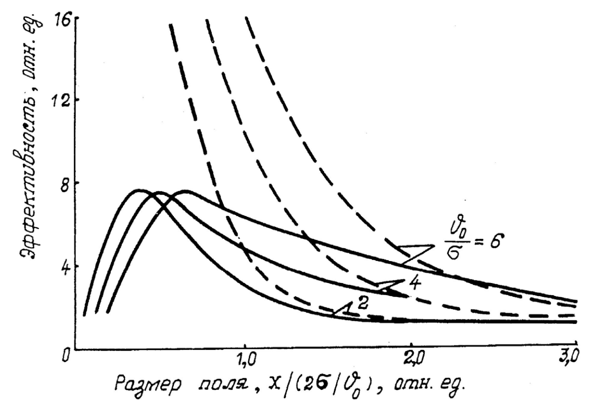


Рис. 3. *Сравнительная эффективность траекторий: --- – построчная расходящаяся; —— – спиральная*

Из весьма очевидного сопоставления выражений (6, *а* и 6, *б*) следует, что алгоритм построчного расходящегося сканирования фазового пространства по сравнению со спиральной траекторией просмотра пространства наблюдения, обеспечивает выигрыш в величине вероятности перехвата объекта в кадре изображения пространства численно равный удвоенному значению интеграла вероятности: $2\Phi(U)$. Сравнение зависимостей (6, *а* и 6, *б*) отражает изменение эффективности применения первых двух типов разверток в зависимости от относительных скорости движения объекта (υ_0/σ) и размера поля или относительного времени поиска $(\sim\sigma/\upsilon_0)$. Эффективность центрированного относительно центра поля поиска сканирования по сравнению с обычной траекторией последовательного просмотра ячеек пространства наглядно (пунктир – построчная расходящаяся, сплошная линия – спиральная) представляет рис. 3. В поле поиска, примерно равном 2σ, наиболее эффективны поисковые развертки по расходящимся траекториям. Без учета влияния вида шума и особенностей изменения энергии сигнала от объекта по вероятности перехвата наиболее эффективен алгоритм построчного

расходящегося сканирования фазового пространства. Этот алгоритм обеспечивает и наибольшее быстродействие перехвата объекта в пространстве наблюдения. Для сканирования и анализа фазового пространства наблюдения также могут быть использованы методы стохастической геометрии [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакут П.А., Троицкий И.Н., Демин А.А., Сафронов А.Н. Современное состояние фазовой проблемы в оптике // Зарубежная радиоэлектроника. – 1978. – № 11. – С. 3–40.
2. Устинов Н.Д., Матвеев И.Н., Протопопов В.В. Методы обработки оптических полей в лазерной локации. – М.: Наука, 1983. – 272 с.
3. Слободян С.М. Диссекторные гетеродинные системы // Зарубежная радиоэлектроника. – 1986. – № 6. – С. 62–72.
4. Пустынский И.Н., Слободян С.М. Диссекторные следящие системы. – М.: Радио и связь, 1984. – 136 с.
5. Слободян С.М., Цупин А.А. Лазерные навигационные системы автономных транспортных средств // Зарубежная радиоэлектроника. – 1988. – № 6. – С. 13–20.
6. Слободян С.М. Предельная и контрастная чувствительности сканирующих оптических измерительных систем с обратной связью // Измерительная техника. Метрология. – 2004. – № 5. – С. 12–22.
7. Слободян С.М. Следящий оптический фазометр // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 6. – С. 101–106.
8. Слободян С.М. Метод фазового слежения в гетеродинном интерферометре контроля перемещений // Измерительная техника. Метрология. – 2004. – № 2. – С. 14–27.
9. Слободян С.М. Многомернокоординатный привод микроуправления // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 5. – С. 92–95.
10. Слободян М.С., Слободян С.М. Консольный пьезопривод // Датчики и системы. – 2003. – № 3. – С. 47–48.
11. Леньков С.В. Приводы микроперемещений с актюаторами на основе магнитоупругого эффекта Видемана // Известия вузов. Приборостроение. – 2004. – Т. 47. – № 2. – С. 49–52.
12. Федотов Н.Г. Анализ биологических микрообъектов с помощью методов стохастической геометрии // Измерительная техника. – 2004. – № 4. – С. 62–64.

УДК 622.243.94